

鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩的碱性溶蚀作用

田建锋^{1,2,3}, 刘池洋^{1,2}, 王桂成³, 邱欣卫^{1,2}

1. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069

2. 西北大学含油气盆地研究所, 陕西西安 710069

3. 西安石油大学油气资源学院, 陕西西安 710065

摘要: 为弄清鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层孔隙度与富铁绿泥石胶结的关系, 运用铸体薄片、扫描电镜、电子探针等技术分析了砂岩的孔隙特征、岩石组分特征及孔隙与岩石组分的关系, 认为绿泥石包膜对孔隙的保护作用有限, 火山物质(火山灰杂基和火山岩岩屑)的碱性溶蚀是孔隙发育的主要原因, 通过定量计算绿泥石的铁质来源, 认为这种火山物质属于中—基性火山岩, 在早成岩阶段 A 期 7%~11% 的中基性火山物质发生碱性溶蚀, 产生了 8% 的碱性溶蚀粒间孔隙, 同时生成了 3% 的孔隙衬里绿泥石。绿泥石胶结物的广泛分布只是指示成岩早期发生了大量的火山物质溶蚀并产生了可观的碱性溶蚀孔。

关键词: 碱性溶蚀孔; 绿泥石胶结; 火山物质; 延长组; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2011)01-0103-08

收稿日期: 2010-06-10

Alkaline Dissolution of Sandstone in the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin

TIAN Jian-feng^{1,2,3}, LIU Chi-yang^{1,2}, WANG Gui-cheng³, QIU Xin-wei^{1,2}

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. Institute of Oil and Gas of Northwest University, Xi'an 710069, China

3. College of Oil & Gas Resources, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

Abstract: In order to figure out the relationship between reservoir porosity and iron-rich chlorite cementation, the pore characteristic, rock constituents and relationship between pore and rock constituents of sandstone were studied by using cast thin sections, scanning electron microscope and electron microprobe techniques. The study reveals that the pore-line chlorite offers limited protection to the porosity, and the greatest contribution to the porosity is alkaline dissolution of volcanic materials. The volcanic materials (matrix and grain) belong to medium-basic volcanics through quantitative calculation of iron content in the chlorite cementation. During the early diagenetic stage, A 7%—11% medium-basic volcanics were dissolved, and this alkaline dissolution process yielded 8% secondary porosity and 3% pore-lining chlorite. The widespread chlorite cementation just indicates that abundant medium-basic volcanics were dissolved and considerable alkaline dissolution pore was generated.

Key words: alkaline dissolution; chlorite cementation; volcanic materials; Yanchang Formation; petroleum geology.

0 引言

孔隙是储层中赋存油气的主要场所, 是油气勘探、开发重要的研究对象之一。孔隙的微观特征研究、成因类型及宏观分布规律预测, 对油气的勘探和开发都具有十分重要的理论价值和生产意义(邱世祥等, 1991; 孟卫工和孙洪斌, 2007)。

不同成因的孔隙类型具有完全不同的控制因素(孟卫工和孙洪斌, 2007), 正确识别孔隙成因是恢复孔隙演化和进行储层预测的基础, 特别是次生孔隙的识别尤为关键。常见的次生孔隙类型可分为 3 种成因类型, 即: (1) 酸性溶蚀孔。包括大气淡水下渗淋滤和有机质脱羧酸性流体溶蚀, 主要是导致长石、岩屑、碳酸盐胶结物、浊沸石胶结物等的溶蚀(陈丽华

等, 1999; 郭春清等, 2003; 李汶国等, 2005); (2) 碱性溶蚀孔. 半干旱—干旱环境下的盐湖沉积砂岩中, 保留的碱性孔隙流体导致石英、岩屑颗粒等的溶蚀(陈忠等, 1996; 邱隆伟等, 2001, 2002); (3) 热循环对流溶蚀孔. 在特殊地质条件下, 孔隙流体发生热循环对流, 从而导致碳酸盐从低温区向高温区溶蚀转移, 而石英从高温区向低温区发生溶蚀转移, 形成局部的次生溶蚀孔(纪友亮等, 1995; 陈丽华等, 1999). 因碱性溶蚀孔受干旱气候控制而缺乏普遍性, 热循环对流溶蚀孔因形成条件苛刻而分布非常有限, 而酸性溶蚀孔却易于发生且分布广泛, 因此自 20 世纪 70 年代 Schmidt 和 MacDonald 提出次生溶蚀孔以来(梅博文和杨文宽, 1991), 绝大多数学者(Surdam *et al.*, 1989; 梅博文和杨文宽, 1991; 蔡春芳等, 1997; 罗孝俊和杨卫东, 2001; 郭春清等, 2003; 李汶国等, 2005) 都致力于研究酸性溶蚀孔隙的形成及其分布, 特别是对成岩作用后期有机酸性流体溶蚀的研究, 取得了丰硕的成果, 但是对于与酸性溶蚀孔相对应的碱性溶蚀孔, 却缺乏足够的重视, 只有少数学者(陈忠等, 1996; 邱隆伟等, 2001, 2002; 王京等, 2006; 钟大康等, 2007) 研究了碱性环境中石英颗粒的溶蚀现象和溶蚀机理, 而对碱性溶蚀作用的形成条件、演化过程及其普遍性缺乏深入研究, 甚至可能将早期颗粒和杂基的碱性溶蚀孔误认为原生粒间孔或酸性溶蚀孔, 本文对鄂尔多斯盆地三叠系延长组的孔隙特征、自生矿物性质、岩石组分和孔隙演化过程等进行了系统分析, 认为该区存在广泛的碱性溶蚀作用, 并论证了碱性溶蚀孔的成因及其意义.

1 鄂尔多斯延长组储层岩石学及其孔隙特征

鄂尔多斯盆地晚三叠系延长组为一大型淡水内陆湖泊, 形成了一套近千米厚的河—湖三角洲沉积地层(何自新和贺静, 2004), 三角洲(水下)分流河道砂体是主要的储集层, 以细砂岩为主, 其次是极细砂岩和中砂岩, 分选较好, 磨圆中等, 成分成熟度低, 主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩, 其次为长石岩屑砂岩和岩屑砂岩, 杂基含量低, 但胶结物含量高, 主要发育绿泥石、(铁)方解石、浊沸石、石英和高岭石等.

延长组砂岩孔隙度主要为 8%~15%, 一般认为孔隙类型主要包括原生粒间孔(或剩余粒间孔)、长石溶孔、岩屑溶孔、浊沸石溶孔和碳酸盐溶孔, 其

次为晶间孔、铸模孔和杂基内微孔(何自新和贺静, 2004). 其中最重要的孔隙类型是原生粒间孔(图 1a~1c), 也是本次研究的主要对象, 其内发育等厚状孔隙衬里绿泥石(即绿泥石胶结原生孔隙相(柳益群和李文厚, 1996; 李文厚等, 1998; 王琪等, 2005), 下面称为绿泥石孔隙), 孔隙直径较大(0.02~0.15 mm)(图 1a~1c), 孔隙直径最大接近平均颗粒粒度直径, 部分孔隙内可见浑圆状颗粒溶蚀残余(图 1a, 1e), 同时具有全消光的特征, 且其边缘未见绿泥石包膜残余, 一些孔隙中或溶蚀残余物内还可见不透明的钛铁质(图 1a); 长石、岩屑溶蚀孔隙分布不均匀, 溶蚀程度差异较大, 但可见被溶蚀颗粒边缘残余绿泥石包膜保留完整; 浊沸石、碳酸盐胶结物基本都有溶蚀残余, 特征明显, 易于识别; 而其他各种孔隙孔隙空间小, 对储层意义不大.

2 孔隙成因类型及其证据

绿泥石胶结原生孔隙是鄂尔多斯盆地延长组最重要的储集空间, 根据其孔隙特征、岩石学特征、孔隙与自生矿物之间的关系等方面, 对其成因作了以下分析:

(1) 大部分绿泥石孔隙直径大, 这一特点很容易让人联想到绿泥石胶结对孔隙的保护作用, 因为绿泥石的胶结可以提高岩石的抗压实能力(柳益群和李文厚, 1996; 黄思静等, 2004), 但是绿泥石硬度小(<3), 且绿泥石包膜存在明显的晶间孔, 表明其抗压实作用十分有限; 另外绿泥石胶结还可以通过抑制石英自生加大保护孔隙(Ehrenberg, 1993; Bloch *et al.*, 2002; 黄思静等, 2004; 田建锋等, 2008), 但是研究区主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩, 石英胶结并不发育, 即使在缺乏绿泥石胶结的地方, 石英胶结物的含量也很少超过 3%, 而绿泥石的胶结却常常大于 3%, 因此绿泥石对原生粒间孔隙的保护作用有限.

(2) 部分绿泥石孔隙中或溶蚀残余物内可见不透明的物质(主要为钛铁质, 部分为沥青质), 且溶蚀残余物周围无绿泥石包膜(图 1a~1e). 这种钛铁质没有以分散状的形式分布在颗粒的边缘, 而是绝大部分集中分布在某些孔隙的中间部位, 说明钛铁质主体不是沉积时期的杂基, 而是一种颗粒溶蚀残余的产物(将其称为未知颗粒); 颗粒溶蚀残余呈浑圆状, 结合其具有全消光的特点, 认为未知颗粒为均质体, 溶蚀速度受颗粒表面积影响, 发生球形溶蚀而成

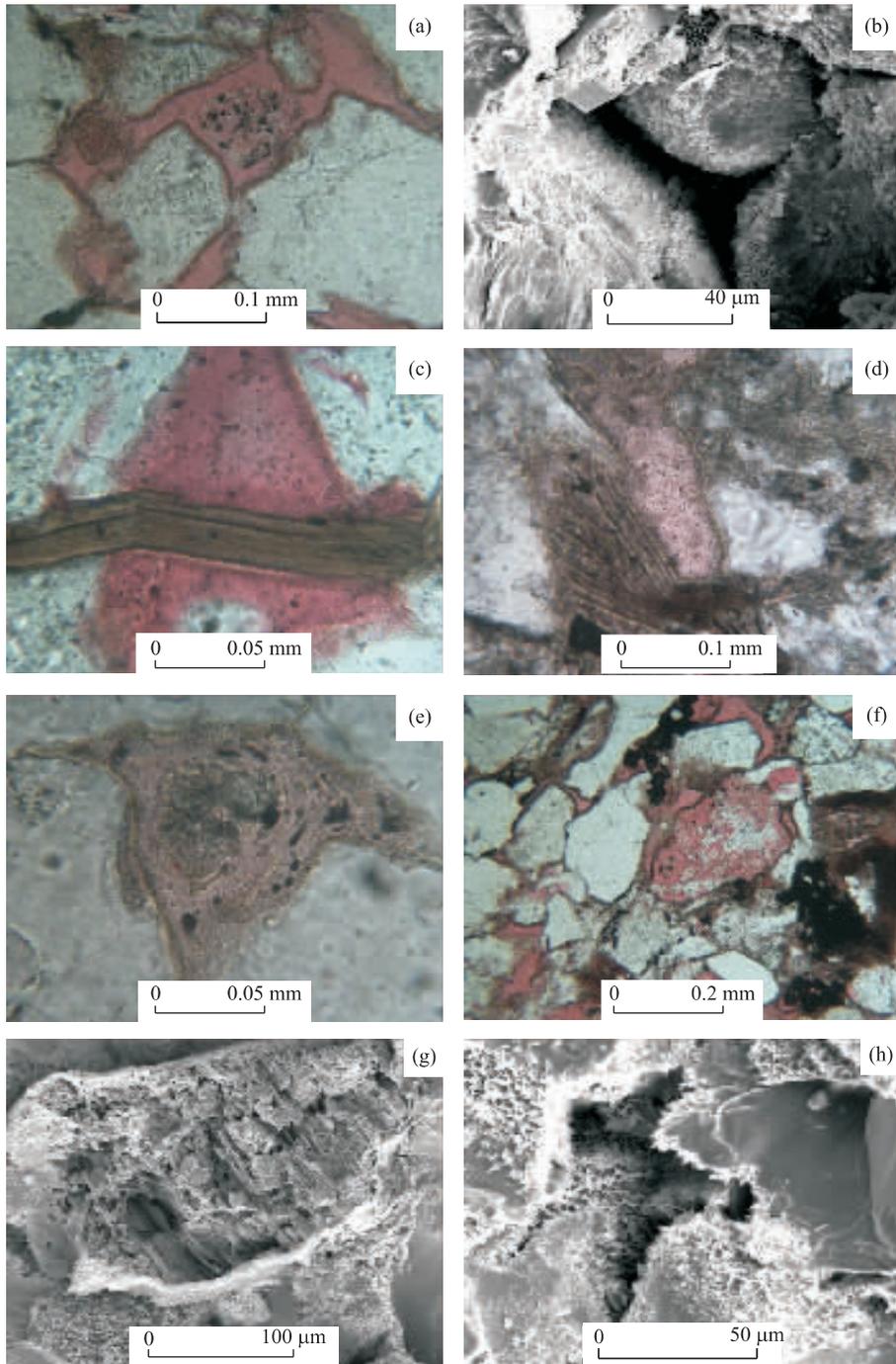


图 1 鄂尔多斯盆地延长组砂岩微观特征

Fig. 1 The microscopic feature of sandstone in Yanchang Formation from Ordos basin

a. 耿 17, 2 007.5 m; b. 资 24 井, 983 m; c. 耿 39 井, 2 047.06 m; d. 芦 10 井, 1 024.2 m; e. 芦 评 9 井, 1 024 m; f. 耿 31 井, 2 049.82 m; g. 金 油 12 井, 694.55 m; h. 资 12 井, 741.5 m

浑圆状. 因此未知颗粒是一种含钛铁质的易溶均质体颗粒, 可能是火山岩玻璃, 且与绿泥石孔隙关系密切.

(3) 未知颗粒边缘无残余绿泥石包膜, 而一些长石、岩屑边缘可见明显的绿泥石包膜(图 1f, 1g), 且长石、岩屑溶蚀殆尽之后, 仍有绿泥石包膜残余, 说

明绿泥石包膜形成于长石、岩屑颗粒溶蚀之前, 且在长石、岩屑颗粒溶蚀时期, 绿泥石包膜无明显变化, 即绿泥石包膜形成之后就能较完整地保留, 而未知颗粒边缘无绿泥石包膜, 说明未知颗粒溶蚀作用发生在绿泥石形成之前或同时. 未知颗粒溶蚀发生在长石溶蚀之前, 而长石颗粒在酸性条件下很不稳定,

说明未知颗粒溶蚀时期,不是典型的酸性成岩环境,而是有利于未知颗粒溶蚀的另一种成岩环境。

(4)未知颗粒溶蚀发育的周围,孔隙衬里绿泥石胶结一般相对更发育,绿泥石包膜较发育的地方,孔隙粒径一般相对较大,且未知颗粒的溶蚀和绿泥石包膜的形成都发生在早成岩作用阶段,因此可以推断绿泥石包膜的形成和未知颗粒的溶蚀具有成因上联系。

(5)研究区镜下薄片鉴定结果显示,绿泥石的含量在 2%~6%,最高达到 11%,黄思静(2001)^①通过 2 353 个薄片统计的平均值为 3.9%(面积百分含量),而绿泥石包膜主体的电子探针测试结果表明,自生绿泥石中铁质(FeO)的平均含量在 25%以上(白清华,2009),是典型的富铁绿泥石,考虑到绿泥石包膜外层具有少量晶间孔,将其体积百分含量以 3%计算,则单位体积砂岩中绿泥石内 FeO 含量:

$$\text{FeO} = \text{单位体积} 1 \times \text{绿泥石的体积百分含量} \times \text{绿泥石的相对密度} \times \text{绿泥石中 FeO 所占的百分含量} = 1 \times 3\% \times 3.0 \times 25\% = 0.0225$$

(绿泥石的相对密度在 2.68~3.40 之间,且随 Fe 的含量增加而增加,这里取 3.0)。

孔隙衬里绿泥石胶结在世界许多盆地砂岩中均有分布,如德克萨斯州南部第三系的海相三角洲砂体(Grigsby, 2001)、叙利亚三叠纪的 Kahar 滨海砂岩、挪威侏罗系的 Haltenbanken 潮控三角洲砂体(Billault *et al.*, 2003)、挪威早侏罗系 Pliensbachian 海相三角洲砂体(Ehrenberg, 1993)等,且都是富铁绿泥石,因此铁质来源是分析绿泥石成因的关键,前人对此也有很深入的探讨,如 Ehrenberg(1993)和 Grigsby(2001)认为,这些铁质主要由火山岩碎屑和各种暗色矿物发生风化而产生,然后通过河流以胶体的形式带入海口,在河口坝、水下分流河道等沉积环境中因海水电解质的加入,使铁质发生絮凝而形成含铁沉积物,最终在成岩阶段成为绿泥石胶结的铁质来源。但是鄂尔多斯盆地延长期属于淡水湖泊三角洲沉积,河水与湖水电解质性质相似,难以发生絮凝,同时研究还发现,孔隙衬里绿泥石不仅在姬塬、安塞地区的三角洲前缘砂体中发育,在盆地北部横山县内的长 2 三角洲平原砂体中,绿泥石也十分发育。因此,这种胶体絮凝的铁质沉积物不可能是研究区的主要铁质来源。另外,鄂尔多斯盆地延长组黑云母含量较高且发生了一定的蚀变,能

提供一定的铁质,但是研究区黑云母的含量一般不超过 5%,黑云母的空间分布与绿泥石分布也无明显的正相关,且大部分黑云母蚀变的程度不超过 15%,则单位体积砂岩中黑云母能提供的 FeO:

$$\text{FeO} = \text{单位体积} 1 \times \text{黑云母的体积百分含量} \times \text{黑云母的相对密度} \times \text{黑云母中 FeO 所占的百分含量} \times \text{黑云母的溶蚀程度} = 1 \times 5\% \times 3.1 \times 22\% \times 15\% = 0.005$$

(黑云母相对密度 3.02~3.12,这里取 3.1;未见公开发表的延长组黑云母 FeO 的含量,延长组与上部直罗组地层具有相似的物源性质,据苗爱生等(2009)测试黑云母 FeO 含量 12.07%~25.23%,平均 17.83%,这里取 22%)。

因此,单位体积砂岩中黑云母能提供的铁质不超过 0.005,另外还可见部分黑云母的边缘发育完整的绿泥石薄膜(图 1c,1d),但黑云母未发生明显的蚀变,因此黑云母不可能是绿泥石铁质的主要来源。

根据上述分析认为,最有可能提供大量铁质的物质是沉积的中基性火山物质(以玻璃质为主的火山岩岩屑和火山灰杂基),主要有以下几方面的证据:

(1)延长组沉积时期盆地周边地质活动较强烈(刘池洋等,2006),发育火山地震活动,盆地内延长组发育的 K0-K9 几个主要标志层,都和凝灰岩沉积有直接关系,同时发现盆地内延长期震积岩发育普遍(李元昊等,2007,2008),这些都是火山爆发和地震活动的直接证据。

(2)鄂尔多斯盆地延长组砂岩杂基含量低,特别是在富县、安塞、靖边、定边等地,杂基含量都小于 2%,部分层段甚至小于 1%,且绿泥石的分布与杂基含量具有明显的负相关关系;同时延长组砂岩分选性中等,磨圆度也不高,粒度以细砂岩为主,所反映出的结构成熟度与低杂基含量不相匹配。因此可能存在杂基溶蚀,并是绿泥石形成的物质基础之一。

(3)可以观察到未知颗粒大量溶蚀,且未知颗粒残余溶蚀与绿泥石的分布具有明显的正相关关系,同时未知颗粒具有全消光的特征,残余物质中可见钛铁质残余,这些都说明溶蚀颗粒属于喷出岩岩屑(火山玻璃),且能为绿泥石的形成提供物质来源。

(4)邱欣卫(2008)对延长组的 24 个凝灰岩(包括斑脱岩)进行了微量元素地球化学分析,从其 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解(图 2)可以看出,样品数据主体落在安山岩一流纹岩区,多数点落入英安流纹岩—英安岩区,也有部分点落在安山岩区,说明具有中基性

^①黄思静,2001.鄂尔多斯盆地中南部延长组主要油层组有利储集体特征及展布研究.成都:成都理工大学.

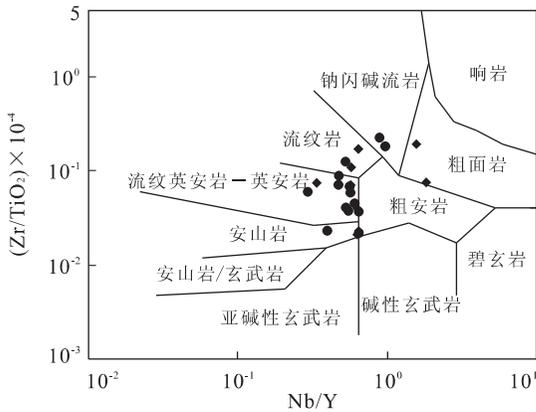


图 2 延长组凝灰岩和斑脱岩 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解(据邱欣卫, 2008)

Fig. 2 The Nb/Y-Zr/TiO₂ diagram of tuff and taylorite

岩的来源。

(5)酸性火山岩中 FeO(包括 2 价铁和 3 价铁)的含量小于 3.2%, 相对密度小于 2.45, 按照上述计算绿泥石内 FeO 含量的公式, 则单位体积内需提供 0.0225 的铁质, 酸性火山岩的含量要大于 28.7%, 但是铸体薄片、扫描电镜等资料显示, 不可能有如此多的物质发生了溶蚀, 因此溶蚀物质以酸性火山物质为主的可能性不大; 中基性火山物质的铁质含量为 6.8%~11.8%, 则单位体积内需提供 0.0225 的铁质, 需要的中基性火山岩物质为 7.8%~13.5%, 同时考虑到黑云母蚀变、粘土矿物转化、泥岩脱水等也可以提供一定量的铁质, 则估计实际需要的中基性火山物质大约为 7%~11%, 主要以骨架颗粒形式发生溶蚀, 也可能是以杂基形式的火山物质溶蚀。

3 孔隙演化过程

火山爆发和地震活动的发生, 导致先前形成的岩石破碎(包括火山岩、变质岩、沉积岩等), 不用经历长久的原地风化过程(否则不稳定的火山物质很难保留, 这可能也是研究区砂岩长石含量高的重要原因之一), 直接搬运到合适的地方发生沉积, 同时火山灰通过风力搬运和水力搬运后沉积, 形成薄的凝灰岩层或者成为砂岩的杂基组分, 此时岩石的初始孔隙度大致为 36%(何自新和贺静, 2004)。

(1)早成岩阶段 A 期. 随着沉积物开始埋深, 孔隙流体不断被排出, 沉积的火山物质及部分硅酸盐颗粒开始发生水化反应, 释放出丰富的 Ca、Mg、K、Na、Fe 等各种金属阳离子, 原生孔隙不断减小, 在砂岩大量压实完成前后, 孔隙大幅减小, 流体的排出

量迅速减少, 导致孔隙流体的流通性急剧下降, 但是火山物质的水解溶蚀有增无减, 从而导致成岩流体离子浓度快速上升, 形成了富 Fe 的碱性流体, 并产生大量的绿泥石胶结. 这个过程中溶蚀形成的粒间孔隙约为 8%, 压实损失孔隙为 18%, 绿泥石胶结占用 3%, 剩余孔隙为 23%。

(2)早成岩阶段 B 期. 随着埋深的加大, 剩余的火山物质进一步溶蚀也产生了一定的溶蚀孔和绿泥石胶结, 同时粘土的转化为孔隙流体提供了丰富的 Na⁺、Ca²⁺、Fe³⁺、Mg²⁺ 和 Si⁴⁺ 离子, 开始沉淀(铁)方解石; 在该阶段末, 有机质逐渐成熟, 随着孔隙介质 pH 值的降低, 砂岩中长石等易溶组分的溶解开始发生, 但与该机理有关的主要溶解作用发生在后面的中成岩阶段 A 期. 本阶段以压实作用为主, 由此损失的孔隙度达 8%, 同时产生了约 1% 的绿泥石胶结, 以及少量的石英和方解石胶结, 溶蚀作用较弱, 剩余孔隙为 14%。

(3)中成岩 A 期. 泥岩中的有机质已进入成熟阶段, 砂岩中的成岩介质逐渐转变为酸性, P_{CO₂} 也逐渐升高, 长石、岩屑等铝硅酸盐及其他易溶组分开始发生酸性溶蚀, 同时少量的绿泥石胶结物也发生了伊利石化(图 1h), 成岩流体中 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Si⁴⁺ 离子的浓度进一步升高, 由于此阶段孔隙流体流通性相对较差, 溶蚀产物不能及时地带出, 导致部分溶蚀产物以高岭石和石英胶结的形成充填孔隙; 当达到该成岩阶段的后期时, 酸性流体供给不足, 同时砂岩孔隙中因长石等铝硅酸盐矿物的溶解而富含 Ca²⁺ (加之粘土矿物转化提供的 Ca²⁺、Fe²⁺ 和 Mg²⁺ 离子), 导致碳酸盐胶结普遍. 此阶段压实作用损失孔隙为 2%, 溶蚀增加的孔隙为 3.5%. 高岭石、石英胶结为 1.5%, 碳酸盐胶结为 2%, 剩余孔隙为 12%。

4 碱性溶蚀的地质意义

在早成岩阶段 A 期, 中一基性火山物质发生碱性溶蚀, 形成了大量的碱性溶蚀孔, 同时部分溶蚀产物发生结晶形成绿泥石包膜, 这个过程具有以下石油地质意义:

(1)过去对酸性溶蚀作用的研究程度很高, 而对碱性溶蚀作用重视不够, 通过对延长组碱性溶蚀作用的分析, 可以发现碱性溶蚀一样可以产生可观的溶蚀孔隙。

(2)以前总将绿泥石胶结原生孔隙发育归结为绿泥石包膜对原生孔隙的保护作用, 虽然绿泥石包

膜抑制了石英自生加大的发育,但是对孔隙的保护作用十分有限,碱性溶蚀孔隙的提出,极好地解释了绿泥石胶结与孔隙发育的关系。

(3)绿泥石包膜主要是由中—基性火山物质溶蚀产物结晶而成,它是碱性溶蚀的标志性矿物之一,因此绿泥石含量的高低,可以指示早期碱性次生孔隙的发育程度;同时也说明延长期鄂尔多斯盆地周围存在中基性火山活动,且主要分布在盆地东北部、东部,通过深入分析绿泥石胶结的横向和纵向分布规律,还可以揭示中基性火山活动的规模和演化规律。

(4)物质的大量溶蚀改变了岩石的原始沉积组分,在未正确判断碱性溶蚀作用发生的规模时,很难准确分析物源性质和确定物源方向。

5 结论

鄂尔多斯盆地延长组砂岩中,以岩屑颗粒和杂基的形式沉积 7%~11%的中基性火山物质,在早成岩 A 期,这些物质发生碱性溶蚀,形成了 8%的碱性溶蚀粒间孔隙和 3%的孔隙衬里绿泥石胶结物,形成的绿泥石对孔隙的保护作用十分有限,绿泥石胶结只是指示早期发生了大量的火山物质溶蚀并产生了可观的溶蚀孔隙;通过分析绿泥石胶结物的分布特征,可以揭示盆地周围中基性火山活动的规模和演化规律,同时碱性溶蚀作用的认识,有利于恢复岩石的原始沉积组分,是准确分析物源性质和确定物源方向的基础。

References

Bai, Q. H., 2009. Formation process and distribution of laumontite cements in Yanchang Formation (Upper Triassic) of Ordos basin (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).

Billault, V., Beautort, D., Baronnet, A., et al., 2003. A nanopetrographic and textural study of grain-coating chlorites in sandstone reservoirs. *Clay Minerals*, 38(3): 315—328. doi:10.1180/0009855033830098

Bloch, S., Lander, R. H., Bonnell, L., 2002. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: origin and predictability. *AAPG Bulletin*, 86(2): 301—328. doi:10.1306/61EEDABC—173E—11D7—8645000102C1865D

Cai, C. F., Mei, B. W., Ma, T., et al., 1997. The source, distribution of organic acids in oilfield waters and their

effects on mineral diagenesis in Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(3): 103—108 (in Chinese with English abstract).

Chen, L. H., Zhao, C. L., Ji, Y. L., et al., 1999. Three formation mechanisms of secondary porosity in clastic gas reservoir rocks. *Petroleum Exploration and Development*, 26(5): 77—79 (in Chinese with English abstract).

Chen, Z., Luo, Z. T., Shen, M. D., et al., 1996. Study of secondary pore formation on the basis of chemical behaviour of minerals in alkaline-flooding agents. *Journal of Southwestern Petroleum Institute*, 18(2): 15—19 (in Chinese with English abstract).

Di, S. X., Zhu, Z. Q., Liu, Y. Q., et al., 1991. The pore structure of clastic reservoir in China. Northwest University Press, Xi'an (in Chinese).

Ehrenberg, S. N., 1993. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain-coating chlorite: examples from the Norwegian Continental Shelf. *AAPG Bulletin*, 77(7): 1260—1286. doi:10.1306/BDF8E5C—1718—11D7—8645000102C1865D

Grigsby, J. D., 2001. Origin and growth mechanism of authigenic chlorite in sandstones of the lower Vicksburg Formation, South Texas. *Journal of Sedimentary Research*, 71(1): 27—36. doi:10.1306/060100710027

Guo, C. Q., Shen, Z. M., Zhang, L. Y., et al., 2003. The corrosion and its mechanism of organic acids on main minerals in oil-gas reservoir sand rocks. *Geology Geochemistry*, 31(3): 53—57 (in Chinese with English abstract).

He, Z. X., He, J., 2004. Reservoir atlas of Mesozoic in Ordos basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

Huang, S. J., Xie, L. W., Zhang, M., et al., 2004. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos basin and Sichuan basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(3): 273—281 (in Chinese with English abstract).

Ji, Y. L., Zhao, C. L., Liu, M. H., 1995. The fluid-flowing convection and the formation of diagenetic traps in the Dongpu depression. *Experimental Petroleum Geology*, 17(1): 8—16 (in Chinese with English abstract).

Li, W. G., Zhang, X. P., Zhong, Y. M., 2005. Formation mechanism of secondary dissolved pores in arcose. *Oil and Gas Geology*, 26(2): 220—223, 229 (in Chinese with English abstract).

Li, W. H., Liu, Y. Q., Feng, Q., 1998. Reservoir characteris-

- tics and hydrocarbon accumulation regularity of the Chang 6 oil-bearing beds in the Chuankou oil field, Shaanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 117—127 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. H., Liu, C. Y., Wang, X. J., 2008. Discovery and significance of seismites in Late Tertiary Yanchang Formation of Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(5): 772—779 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. H., Liu, C. Y., Wang, X. J., et al., 2007. Characteristics and geological significance of sandstone dikes in the Triassic Yanchang Formation of the Ordos basin. *Geology in China*, 34(3): 400—405 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. Y., Zhao, H. G., Gui, X. J., et al., 2006. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin. *Acta Geological Sinica*, 80(5): 617—638 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Q., Li, W. H., 1996. Diagenetic characteristics and porosity evolution of the oil-bearing arkoses in the upper triassic in the eastern Shanganing basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(3): 87—96 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X. J., Yang, W. D., 2001. The effect of organic acid on feldspar solubility: a thermodynamic study. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(2): 183—188 (in Chinese with English abstract).
- Mei, B. W., Yang, W. K., 1991. Translation: reservoir geochemistry. The Northwest University Press, Xi'an (in Chinese).
- Meng, W. G., Sun, H. B., 2007. Clastic rock reservoir of the Paleogene in Liaohe depression. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Miao, A. S., Lu, Q., Liu, H. F., et al., 2009. Occurrence and formation of coffinite in ancient interlayer oxidizing zone of sandstone type U-deposit in Ordos basin. *Geological Science and Technology Information*, 28(4): 51—58 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, L. W., Jiang, Z. X., Cao, Y. C., et al., 2001. Alkaline diagenesis and its influence to reservoir in Biyang depression. *Science in China (Ser. D)*, 31(9): 752—759 (in Chinese).
- Qiu, L. W., Jiang, Z. X., Chen, W. X., 2002. A new type of secondary porosity-quartz dissolution porosity. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 621—627 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. W., 2008. Characteristics and forming environments of tuffs in Yanchang Formation in Ordos basin (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Surdam, R. C., Crossey, L. J., Hagen, E. S., et al., 1989. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. *AAPG Bulletin*, 73(1): 1—23.
- Tian, J. F., Chen, Z. L., Yang, Y. Y., 2008. Protection mechanism of authigenic chlorite on sandstone reservoir pores. *Geological Science and Technology Information*, 27(4): 49—54 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Zhao, Y. C., Liu, K., et al., 2006. Superimposing controls of acidic and alkaline dissolutions on sandstone reservoir quality of the Paleozoic Xiashihezi and Shanxi Formations in Tabamiao area, Ordos basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 221—228 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhou, X. Z., Chen, G. J., et al., 2005. Diagenetic evolution and high quality reservoir in Chang 6 sandstone in the western Ordos basin. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 17—23 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, D. K., Zhu, X. M., Zhou, X. Y., et al., 2007. An approach to categories and mechanisms of SiO₂ dissolution in sandstone reservoirs in the Tarim basin. *Chinese Journal of Geology*, 42(2): 403—414 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白清华, 2009. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组浊沸石分布及成因探讨(硕士论文). 西安: 西北大学.
- 蔡春芳, 梅博文, 马亭, 等, 1997. 塔里木盆地有机酸来源、分布及对成岩作用的影响. *沉积学报*, 15(3): 103—108.
- 陈丽华, 赵澄林, 纪友亮, 等, 1999. 碎屑岩天然气储集层次生孔隙的三种成因机理. *石油勘探与开发*, 26(5): 77—79.
- 陈忠, 罗蛰潭, 沈明道, 等, 1996. 由储层矿物在碱性驱替剂中的化学行为到砂岩储层次生孔隙的形成. *西南石油学院学报*, 18(2): 15—19.
- 邱世祥, 祝总祺, 柳益群, 等, 1991. 中国碎屑岩储集层的孔隙结构. 西安: 西北大学出版社.
- 郭春清, 沈忠民, 张林晔, 等, 2003. 砂岩储层中有机酸对主要矿物的溶蚀作用及机理研究综述. *地质地球化学*, 31(3): 53—57.
- 何自新, 贺静, 2004. 鄂尔多斯盆地中生界储层图册. 北京: 石油工业出版社.
- 黄思静, 谢连文, 张萌, 等, 2004. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 31(3): 273—281.
- 纪友亮, 赵澄林, 刘孟慧, 1995. 东濮凹陷地层流体的热循环对流与成岩圈闭的形成. *石油实验地质*, 17(1): 8—16.

- 李汶国, 张晓鹏, 钟玉梅, 2005. 长石砂岩次生溶孔的形成机理. 石油与天然气地质, 26(2): 220—223, 229.
- 李文厚, 柳益群, 冯乔, 1998. 川口油田长 6 段油层组储集层特征与油气富集规律. 岩石学报, 14(1): 117—127.
- 李元昊, 刘池洋, 王秀娟, 2008. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组震积岩特征研究. 沉积学报, 26(5): 772—779.
- 李元昊, 刘池洋, 王秀娟, 等, 2007. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩墙(脉)特征及其地质意义. 中国地质, 34(3): 400—405.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应. 地质学报, 80(5): 617—638.
- 柳益群, 李文厚, 1996. 陕甘宁盆地上三叠统含油长石砂岩的成岩特点及孔隙演化. 沉积学报, 14(3): 87—96.
- 罗孝俊, 杨卫东, 2001. 有机酸对长石溶解度影响的热力学研究. 矿物学报, 21(2): 183—188.
- 梅博文, 杨文宽, 1991. 储层地球化学译文集. 西安: 西北大学出版社.
- 孟卫工, 孙洪斌, 2007. 辽河拗陷古近系碎屑岩储层. 北京: 石油工业出版社.
- 苗爱生, 陆琦, 刘惠芳, 等, 2009. 鄂尔多斯砂岩型铀矿床古层间氧化带中铀石的产状和形成. 地质科技情报, 28(4): 51—58.
- 邱隆伟, 姜在兴, 操应长, 等, 2001. 泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响. 中国科学(D 辑), 31(9): 752—759.
- 邱隆伟, 姜在兴, 陈文学, 2002. 一种新的储层孔隙成因类型——石英溶解型次生孔隙. 沉积学报, 20(4): 621—627.
- 邱欣卫, 2008. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层特征和形成环境(硕士论文). 西安: 西北大学.
- 田建锋, 陈振林, 杨友运, 2008. 自生绿泥石对砂岩储层孔隙的保护机理. 地质科技情报, 27(4): 49—54.
- 王京, 赵彦超, 刘琨, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上古生界砂岩储层“酸性+碱性”叠加溶蚀作用与储层质量主控因素. 地球科学——中国地质大学学报, 31(2): 221—228.
- 王琪, 嵯喜准, 陈国俊, 等, 2005. 鄂尔多斯西部长 6 砂岩成岩演化与优质储层. 石油学报, 26(5): 17—23.
- 钟大康, 朱筱敏, 周新源, 等, 2007. 初论塔里木盆地砂岩储层中 SiO_2 的溶蚀类型及其机理. 地质科学, 42(2): 403—414.